

Jornadas de Automática

Estudio de confort térmico con perspectiva de género

Leal, M.^{a,b,*}, Abad-Alcaraz, V.^{a,b}, Castilla, M.^{a,b}, Álvarez, J. D.^{a,b}

^aCIESOL, Centro de Investigaciones en Energía Solar. Centro mixto UAL-CIEMAT, Universidad de Almería - ceiA3 - Crta. Sacramento, s/n, 04120, La Cañada de San Urbano, Almería, España.

^bDpto. de Informática, Universidad de Almería - ceiA3, Crta. Sacramento, s/n, 04120, La Cañada de San Urbano, Almería, España

To cite this article: Leal, M., Abad-Alcaraz, V., Castilla, M., Álvarez, J. D. 2024. Thermal comfort study with a gender perspective. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10891>

Resumen

Los índices más utilizados para estimar el confort térmico se basan en fórmulas estandarizadas o recomendaciones empíricas, sin considerar características fisiológicas individuales como género, edad e índice de masa corporal. En este estudio se muestran dos ensayos de temperatura en condiciones invernales en los laboratorios del edificio bioclimático CIESOL, con 6 sujetos (3 hombres y 3 mujeres) en diferentes posiciones en cada ensayo. Se monitorizan las variables climáticas y fisiológicas, y se pasan encuestas de sensación de confort para comparar las percepciones de los ocupantes con índices comúnmente utilizados como el Voto Medio Previsto (PMV). Los resultados muestran cómo difiere la sensación de confort de los ocupantes con el PMV calculado considerando las variables climáticas. También se observan diferencias entre hombres y mujeres, destacando la necesidad de nuevos índices que consideren las características humanas. Estos resultados sirven de base para obtener un modelo de confort térmico teniendo en cuenta la perspectiva de género.

Palabras clave: Confort térmico, Diseño del Experimento, Automatización de Edificios, Automatización y diseño centrados en el ser humano, Control basado en el conocimiento.

Thermal comfort study with a gender perspective

Abstract

The most commonly used indexes to estimate thermal comfort are based on standardized formulas or empirical recommendations, without taking into account individual physiological characteristics such as gender, age and body mass index. This study presents two temperature tests under winter conditions in the laboratories of the CIESOL bioclimatic building, with 6 subjects (3 men and 3 women) in different positions in each test. Climatic and physiological variables are monitored, and comfort perception surveys are conducted to compare occupants' perceptions with commonly used indices such as the Predicted Mean Vote (PMV). The results show how occupant comfort varies with the PMV, which is calculated taking into account climatic variables. Differences between men and women are also observed, highlighting the need for new indices that take into account human characteristics. These results serve as a basis for obtaining a thermal comfort model that takes into account the gender perspective.

Keywords: Thermal comfort, Experiment design, Building Automation, Human-centered automation and design, Knowledge-based control.

1. Introducción

La disminución del consumo energético en los edificios es una meta esencial dentro del desarrollo sostenible, ya que el sector residencial y de oficinas contribuye en gran medida al consumo mundial de energía y a las emisiones de carbono. El informe Buildings-GSR 2022 (Cdb, 2022) concluye que, a pesar de un aumento sustancial de la inversión y del éxito a nivel mundial en la reducción de la intensidad energética de los edificios, el consumo total de energía y las emisiones de CO₂ del sector aumentaron en 2021 por encima de los niveles pre-pandémicos. La demanda de energía de los edificios aumentó en torno a un 4 % en 2020.

Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, del inglés *Heating, Ventilation and Air Conditioning*) consumen entre el 40 % y el 60 % de la energía de un edificio, y representan más del 30 % de la demanda energética mundial (Goh et al., 2018). Anticipar el confort térmico de los ocupantes puede ser fundamental para tomar decisiones de control que respondan a sus necesidades de bienestar. En este contexto, comprender el comportamiento de los ocupantes es crucial, ya que numerosos estudios señalan este factor como la principal causa del déficit de rendimiento en los sistemas HVAC (Delzendeh et al., 2017; Chaudhuri et al., 2017).

El control térmico interior en los sistemas de construcción modernos se basa en modelos existentes de sensación térmica y confort (ASHRAE, 2023). Estos modelos se basan principalmente en fórmulas predefinidas o recomendaciones empíricas que no tienen en cuenta las características fisiológicas individuales, como el género, la edad y el índice de masa corporal. Uno de los índices más utilizados para estimar el confort térmico es el Voto Medio Previsto (PMV, del inglés *Predicted Mean Vote*), que se estima a partir de cuatro variables climáticas y dos relacionadas con el usuario. No obstante, este enfoque resulta inapropiado, dado que el confort es una sensación subjetiva que se puede cualificar desde distintos puntos de vista, como el confort térmico, lumínico, acústico y calidad del aire. Esta última ha cobrado relevancia en estos tiempos post-pandémicos Covid-19, y cuya evolución puede ser paralela u opuesta a la del confort térmico en función del tipo de actuación que se realice para su control, como, por ejemplo, ventilación natural o forzada (Castilla et al., 2014). Así, a la hora de controlar el confort, es necesario utilizar índices que tengan en cuenta diversas variables relacionadas con estas sensaciones.

En los últimos años, se han realizado estudios sobre cómo variables fisiológicas, como el género y la edad, afectan la predicción del confort térmico. Estos estudios se han llevado a cabo mediante ensayos en laboratorios con sujetos humanos, considerando tanto las variables ambientales como su sensación de confort. En el trabajo (Pigliautile et al., 2020) se demuestra la conexión estricta entre los parámetros fisiológicos (Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca y sus índices) y el confort térmico humano. En (Chaudhuri et al., 2020) se propone un método mejorado de la predicción del estado térmico mediante la detección de parámetros fisiológicos como la temperatura de la piel de la mano y la frecuencia del pulso, junto con la temperatura del aire ambiente. En (Chaudhuri et al., 2018) se aplicaron rigurosos análisis estadísticos y modelos predictivos demostrando diferencias significativas entre géneros en varias respuestas subjetivas y fisiológicas.

En este trabajo, se presenta la metodología seguida para realizar una serie de experimentos con el objetivo de estudiar cómo influye el género de los ocupantes en la satisfacción térmica dentro de un recinto. Este estudio se ha llevado a cabo en el Centro de Investigación de Energía Solar (CIESOL), un edificio bioclimático situado en el campus de la Universidad de Almería (UAL). La finalidad de este estudio es establecer nuevos índices que reflejen con mayor fidelidad la realidad, incorporando la perspectiva de género. Una vez actualizados estos índices, se podrán desarrollar sistemas de control para mantener el confort térmico de los usuarios.

El resto del artículo se organiza de la siguiente forma: en la sección 2 se amplía el concepto de confort térmico y se describen los principales índices utilizados para su estimación, la sección 3 describe el centro de investigación CIESOL donde se ha realizado el estudio descrito en este trabajo, así como la definición del experimento. Los resultados preliminares obtenidos se muestran y discuten en la sección 4 para, finalmente, en la sección 5 enumerar las conclusiones clave de este estudio junto con las posibles direcciones para investigaciones futuras.

2. Confort térmico

De acuerdo con las normas internacionales ISO 7730 (ISO7730, 2023) y ASHRAE 55 (ASHRAE, 2023), el confort térmico se define como: “La condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico” (Fanger, 1973). Aunque esta definición puede parecer ambigua al dejar abierto el significado de “condición mental” y “satisfacción”, enfatiza que el confort es un proceso cognitivo influido por factores físicos, fisiológicos y psicológicos (ASHRAE, 2009). El confort térmico depende de varias circunstancias, como el entorno, la actividad, y la estación del año. A pesar de las diferencias en climas, condiciones de vida y culturas, la temperatura preferida para sentirse cómodo es similar bajo condiciones comparables de vestimenta, actividad, humedad y velocidad del aire.

Uno de los índices más utilizados para el confort térmico es el PMV que evalúa el equilibrio entre el calor producido por el cuerpo humano y el calor perdido hacia el ambiente. El índice PMV proporciona un valor numérico dentro de una escala de sensación térmica de siete puntos: 0 neutral, ± 1 ligeramente cálido/frío, ± 2 cálido/fresco, ± 3 sofocante/frío. Para garantizar confort térmico en un entorno determinado, diferentes normas recomiendan mantener el PMV en el nivel 0 con una tolerancia de $\pm 0,5$. El PMV se define mediante seis variables que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Variables que definen el confort térmico

Parámetro	Símbolo	Rango	Unidad
Tasa metabólica	M	0,8 – 4	met(W/m ²)*
Aislamiento de la ropa	I_{cl}	0 – 2	clo (m ² °C/W)**
Temperatura del aire	$t_a, (t_a)$	10 – 30	°C
Temperatura radiante media	\bar{t}_r	10 – 40	°C
Velocidad del aire	v_a	0 – 1	m/s
Humedad del aire	γ_{HR}	30 – 70	%

* 1 met=58.15 W/m²

**1 clo=0.155 m² °C/W

El índice PMV se puede estimar de acuerdo a las seis variables anteriores tal como se expresa en (1).

$$PMV = y_{PMV} = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028] \cdot L \quad (1)$$

donde L es la carga térmica del cuerpo humano en W/m^2 que se puede estimar usando (2).

$$\begin{aligned} L = & (M - Q) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - y_T) \\ & - 3,05 \cdot 10^3 \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - Q) - p_a] \\ & - 0,42 \cdot (M - Q - 58,15) - 1,72 \cdot 10^{-5} \\ & \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 39,6 \cdot 10^{-9} \cdot f_{cl} \\ & \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] \\ & - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - y_T) \end{aligned} \quad (2)$$

La temperatura de la superficie de la ropa, t_{cl} , en $^{\circ}C$ viene definida en (3).

$$\begin{aligned} t_{cl} = & 35,7 - 0,028(M - Q) - 0,155 \cdot I_{cl} \\ & \cdot [39,6 \cdot 10^{-9} \cdot f_{cl} \cdot ((t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4)] \\ & + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - y_T) \end{aligned} \quad (3)$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección, h_c , en $W/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ viene definido en (4) y (5).

$$h_c = \begin{cases} 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25}, & A > 12,1 \cdot \sqrt{v_a} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_a}, & A \leq 12,1 \cdot \sqrt{v_a} \end{cases} \quad (4)$$

$$A = 2,38 \cdot (t_{cl} - t_a)^{0,25} \quad (5)$$

El factor de superficie de la ropa, f_{cl} , viene definido en (6).

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,0 + 0,2 \cdot I_{cl}, & I_{cl} \leq 0,5 \text{ clo} \\ 1,05 + 0,1 \cdot I_{cl} & I_{cl} > 0,5 \text{ clo} \end{cases} \quad (6)$$

El resto de parámetros que intervienen en el cálculo del PMV y no han sido definidos con anterioridad son Q , que representa la potencia mecánica efectiva en W/m^2 , que se define como el trabajo realizado por los músculos para llevar a cabo una tarea determinada y p_a es la presión parcial del vapor de agua en el aire en Pa que se determina en función de la humedad relativa y_{HR} .

Existe otro índice estrechamente relacionado con el PMV, denominado PPD (Porcentaje estimado de Insatisfechos), el cual expresa el porcentaje de personas insatisfechas con el ambiente térmico y que está directamente relacionado con el valor del PMV. Este índice se estima utilizando la ecuación (7).

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp[-0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2] \quad (7)$$

A partir de la ecuación anterior, se puede deducir fácilmente que aunque se espera que el índice PMV sea igual a 0, es imposible que el 100 % de las personas estén satisfechas con el entorno, ya que el confort es una condición psicológica, es decir, cada persona tiene su propio concepto de confort térmico.

3. Metodología

3.1. Descripción del sistema e instrumentación

El edificio CIESO1¹, es un Centro de Investigación de Energía Solar situado dentro del Campus de la Universidad de Almería (UAL), en el sureste de España. Es un Centro Mixto de Investigación entre el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas(CIEMAT) y la UAL, albergando grupos de investigación de ambos centros. El edificio tiene una superficie total de 1072 m² divididos en dos plantas. Se encuentran seis despachos, todos ellos orientados al este y situados en la planta baja, a excepción del despacho principal que se encuentra en la planta superior. También consta de ocho laboratorios orientados al norte (cuatro situados en la planta baja y otros cuatro en la planta superior), una planta donde se encuentra una caldera de alto rendimiento y una máquina de absorción y, por último, dependencias para los empleados del centro como la cocina y los aseos.

Este centro de investigación está equipado con una amplia red de sensores que permite monitorizar más de 725 señales con un sistema de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA del inglés *Supervisory, Control And Data Acquisition*). Además, fue diseñado y construido teniendo en cuenta criterios de arquitectura bioclimática. Asimismo, dispone de un sistema de climatización basado en refrigeración solar mediante un campo de captadores solares, un sistema de almacenamiento de agua caliente, una caldera y una máquina de absorción con su torre de refrigeración.

Los experimentos se han llevado a cabo en dos de los laboratorios ubicados en la planta superior del edificio: el laboratorio 5, con una superficie de 27,97 m², y el laboratorio 6, con una superficie de 42,11 m². En la Figura 1(a) se presenta el SCADA de los laboratorios con las principales mediciones, y en la Figura 1(b) se muestra el interior del laboratorio 6, donde se pueden observar algunos de los sensores instalados. La Tabla 2 contiene la información detallada sobre la instrumentación utilizada en el desarrollo de los experimentos. Además, estos laboratorios han sido equipados con actuadores para controlar la comodidad dentro del edificio como sistemas de climatización, apertura automatizada de ventanas y cortinas.

3.2. Descripción del experimento

En este estudio, se ha llevado a cabo un experimento con sujetos humanos para recopilar datos sobre medidas fisiológicas clave, como la frecuencia cardíaca, la saturación de oxígeno, la presión arterial y la temperatura de la piel (Tabla 3), así como la sensación térmica mediante una serie de encuestas. En la Figura 2 se muestra una imagen del laboratorio en el transcurso de uno de los experimentos tomada con la cámara térmica utilizada para medir la temperatura superficial de los ocupantes.

¹<https://ciesol.com/>

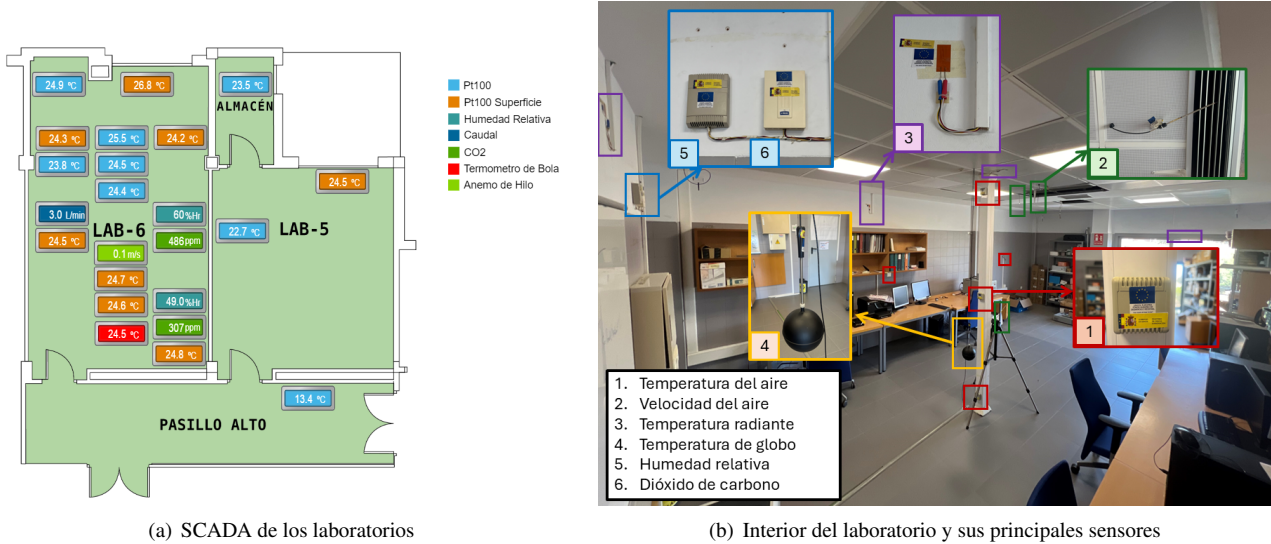


Figura 1: Monitorización de los laboratorios del CIESOL donde se realizan los experimentos

Tabla 2: Información técnica de los sensores para la monitorización de parámetros ambientales

Sensores	Cantidad	Parámetro ambiental	Rango	Precisión
Sensor RTD PT100 RS PRO de 4 hilos	5	Temperatura del aire [°C]	-50 a +200 °C	IEC 60751 Clase B
Anemómetro TSI 8475	3	Velocidad del viento [m/s]	0,05 a 2,5 m/s	±3 %
Sensores de superficie	7	Temperatura radiante [°C]	-80 a +180 °C	±0,5 °C
PT100 DeltaOHM TP875	1	Temperatura de globo [°C]	-30 a +120 °C	±0,2 °C
Vaisala HMW60U	2	Humedad relativa [%]	0 a 95 %	±2 %
Vaisala CARBOCAP®	2	Dióxido de carbono [ppm]	0 a 2000 ppm	±3 %

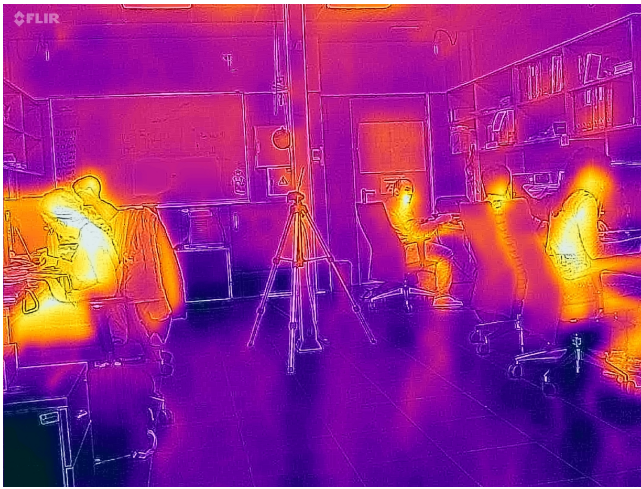


Figura 2: Visión del laboratorio con cámara térmica

El experimento constó de dos ensayos en dos días diferentes, de una duración de 210 minutos cada uno, se realizaron bajo condiciones de invierno con 6 sujetos (3 hombres y 3 mujeres) que han residido en la ciudad de Almería durante los últimos 3 años. Los participantes tenían entre 22 y 31 años, con un IMC que varía entre 18,72 y 25,08. Todos los sujetos vestían de manera uniforme, con camiseta de manga larga, ropa interior, pantalones vaqueros largos y zapatos, que corresponde a una medida de 0,64 clo de acuerdo con (ASHRAE, 2023). La actividad metabólica realizada consistía en estar sentados en reposo, alternando con actividades de lec-

tura y escritura, lo cual corresponde a un valor de 1,2 met de acuerdo con la norma ASHRAE-55 (ASHRAE, 2023) y la velocidad del aire se mantuvo a menos de 0,2 m/s, como se recomienda en (ASHRAE, 2023). Como recomendaciones previas, se indicó evitar el consumo de alcohol, tabaco, café y actividad física intensa al menos 12 horas antes de los experimentos.

Para medir la sensación térmica, cada sujeto completó una encuesta cada 25 minutos durante el transcurso del experimento. Esta encuesta incluye diferentes escalas de medida, que se detallan en la Figura 3. Las primeras cuatro escalas (de la A a la D) se emplearán en futuros estudios para analizar la influencia del género en la sensación de confort y aplicar algoritmos de aprendizaje automático. En este estudio, solo se utilizará la escala E, la cual se comparará en la siguiente sección con métricas como el PMV.

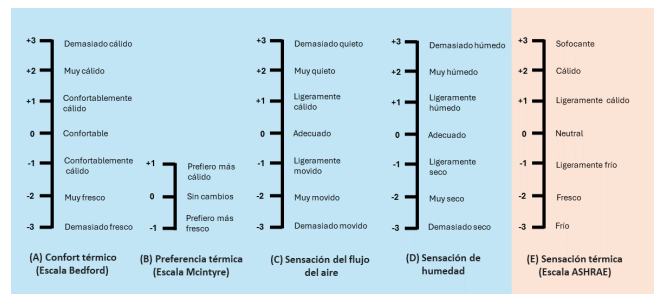


Figura 3: Escalas de votación de las encuestas

Tabla 3: Información técnica de los aparatos utilizados para la monitorización de medidas fisiológicas

Aparato	Parámetro fisiológico	Rango	Precisión
Cámara termográfica FLIR ONE	Temperatura de la piel [°C]	-20 a +120 °C	±3 %
Plusioxímetro	Saturación de oxígeno [%]	70 a 100 %	±3 %
Tensiómetro digital de brazo	Frecuencia cardíaca [ppm]	30 a 180 ppm	±5 %
Tensiómetro digital de brazo	Presión arterial [mmHg]	0 a 300 mmHg	±3 mmHg

La secuencia del ensayo se desarrolló de la siguiente manera: durante los primeros 15 minutos, los sujetos estuvieron en el laboratorio 5, pre-acondicionado a una temperatura confortable de 24 °C. En este tiempo, se explicó el desarrollo del experimento y los sujetos respondieron a la primera encuesta. Transcurridos estos 15 minutos, los sujetos se trasladaron al laboratorio 6 para comenzar el experimento, cuya duración total fue de 195 minutos. Este laboratorio se encuentra pre-acondicionado a una temperatura de 19 °C y llegará hasta una temperatura de 29 °C cambiando la consigna de manera progresiva según como se muestra en la Figura 4. Los sujetos realizan 8 encuestas en el transcurso del experimento en el laboratorio 6 y se realizan una toma de medidas con los aparatos descritos en la Tabla 3.

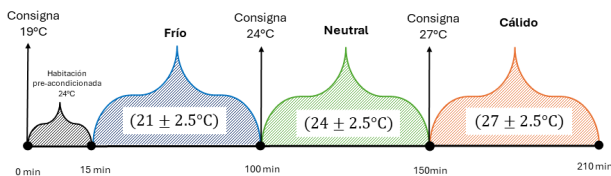


Figura 4: Planificación de los experimentos

El desarrollo del segundo ensayo siguió un procedimiento similar al primero, con los mismos sujetos. Sin embargo, en este caso, se modificó la posición de estos en el laboratorio para equilibrar la distribución, ya que el flujo de aire puede no ser uniforme en todo el laboratorio.

4. Resultados preliminares

Tras analizar los resultados obtenidos, como se observa en la Figura 5, se evidenció que el PMV teórico no se ajusta adecuadamente a la sensación térmica de los usuarios. Tanto en hombres como mujeres el modelo teórico carece de precisión, existiendo hasta incluso tramos del ensayo 1 con un PMV teórico confortable pese a que las condiciones reales de los usuarios apuntaban más hacia una sensación térmica ligeramente cálida, Figura 5(a).

Además, se observan diferencias notables entre hombres y mujeres en la percepción de la temperatura. En el ensayo 1, las mujeres experimentaron sensaciones térmicas más extremas, tanto de sofoco como de frío, las cuales no fueron observadas en hombres. Esta diferencia sugiere una sensibilidad térmica distinta entre los géneros. Resulta destacable que pese a las notables discrepancias entre el PMV teórico y el real, resulta ser más semejante el teórico al de los hombres. Dicha percepción pone de manifiesto que el PMV usado hasta ahora no satisface de igual manera a ambos géneros.

El PMV inicial registrado por los usuarios, mostrado en la Figura 5, pertenece a los 15 minutos que se encuentran en el laboratorio 5 pre-acondicionado a una temperatura neutra. Por esta razón, este valor inicial no es comparable con los resultados teóricos del PMV en esos minutos iniciales, ya que estos corresponden al laboratorio 6. Sin embargo, resulta de gran interés incluirlos para evidenciar el cambio de temperatura entre los laboratorios. En ambos ensayos se aprecia que, de forma general, las mujeres se encuentran durante más tiempo experimentando una sensación ligeramente fría.

En el ensayo 2 se aprecia un PMV más elevado en comparación con el ensayo 1. Este incremento puede deberse a que las temperaturas ambientales exteriores del edificio eran más elevadas durante el desarrollo del ensayo 2, reflejando una mayor acumulación de calor. Estas condiciones térmicas más extremas influyeron significativamente en la percepción térmica de los sujetos.

El PPD obtenido, índice que representa la media de todos los sujetos, permite visualizar gráficamente el grado de insatisfacción tanto al inicio, en la habitación pre-acondicionada, como al final del ensayo debido a las altas temperaturas. En concreto, el aumento del PPD al final de los ensayos confirma la percepción térmica negativa de los usuarios y refuerza el hecho de que el PMV teórico no se ajusta a la realidad observada.

5. Conclusiones y trabajos futuros

A partir de los resultados presentados en la sección anterior, se pueden extraer las siguientes conclusiones: el valor teórico del PMV, considerando únicamente las variables climáticas, difiere considerablemente de la sensación de confort experimentada por los sujetos. De igual manera, el PPD teórico es menor que el real en ambos ensayos, ya que la respuesta proporcionada por los sujetos no coincide con lo esperado teóricamente. Se observan perfiles distintos entre hombres y mujeres, mostrando que las mujeres reaccionan peor a los cambios de temperatura que los hombres en estos resultados preliminares. Esto pone de manifiesto la necesidad de crear nuevos índices de estimación del confort que sean más fieles a la realidad y consideren más variables además de las climáticas.

En trabajos futuros, se realizarán nuevos ensayos con diferentes sujetos durante la estación de verano, utilizando el aire acondicionado, ya que sería beneficioso incluir más sujetos para aumentar la robustez de los resultados. La incorporación de una perspectiva de género en el diseño de edificios y sistemas HVAC no solo mejora el confort de los ocupantes, sino que también puede conducir a un uso más eficiente de la energía y a la creación de espacios más inclusivos y equitativos permitiendo, por ejemplo, diseñar estrategias de control

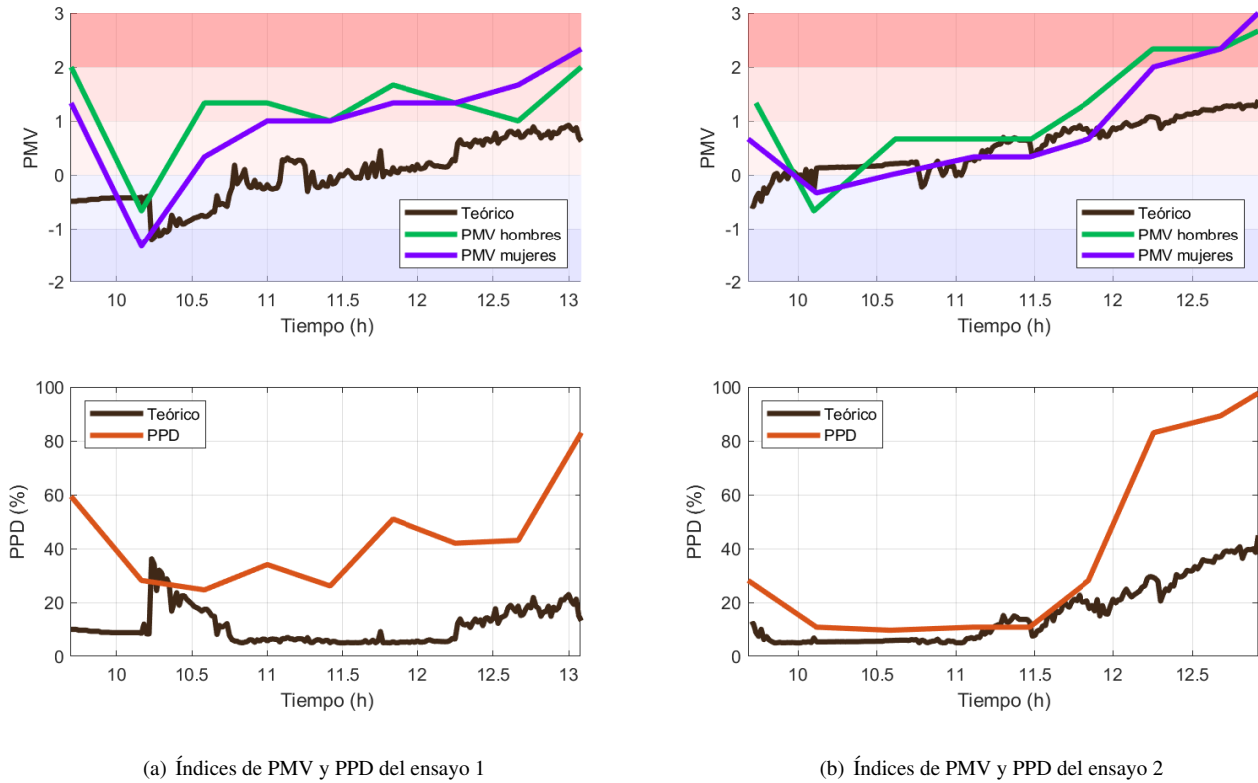


Figura 5: Comparativa entre los índices PMV y PPD teóricos y los obtenidos de forma experimental

que permitan ajustar la temperatura de referencia en función de la predominancia de hombres o mujeres en un espacio o realizar un control por zonas permitiendo realizar ajustes individuales o flexibles para salvar las diferencias existentes entre hombres y mujeres. Para ello, se pueden explorar controladores tradicionales, como los Proporcionales, Integrales y Derivativos (PID) o controladores predictivos basados en modelo (MPC, del inglés *Model Predictive Control*) así como sistemas de control más novedosos basados en lógica difusa o control por refuerzo para este tipo de sistemas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto PID2021-126889OB-I00 perteneciente a la convocatoria de Proyectos de Generación de Conocimiento 2021 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la “Unión Europea”

Referencias

ASHRAE, 2009. ASHRAE Handbook - Fundamentals. Refrigerating American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers.
 ASHRAE, 2023. Ansi/ashrae standard 55-2023 - thermal environmental conditions for human occupancy. Standard.
 Castilla, M. d. M., Álvarez, J., Rodríguez, F., Berenguel, M., 07 2014. Comfort Control in Buildings.
 DOI: 10.1007/978-1-4471-6347-3

Cdb, P., 2022. Global status report for buildings and construction.
 Chaudhuri, T., Soh, Y. C., Li, H., Xie, L., 2017. Machine learning based prediction of thermal comfort in buildings of equatorial singapore. In: 2017 IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC). pp. 72–77.
 DOI: 10.1109/ICSGSC.2017.8038552
 Chaudhuri, T., Soh, Y. C., Li, H., Xie, L., 2020. Machine learning driven personal comfort prediction by wearable sensing of pulse rate and skin temperature. Building and Environment 170, 106615.
 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106615>
 Chaudhuri, T., Zhai, D., Soh, Y. C., Li, H., Xie, L., 2018. Random forest based thermal comfort prediction from gender-specific physiological parameters using wearable sensing technology. Energy and Buildings 166, 391–406.
 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.02.035>
 Delzendeh, E., Wu, S., Lee, A., Zhou, Y., 2017. The impact of occupants’ behaviours on building energy analysis: A research review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 80, 1061–1071.
 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.264>
 Fanger, P. O., 1973. Assessment of man’s thermal comfort in practice. Occupational and Environmental Medicine 30 (4), 313–324.
 DOI: 10.1136/oem.30.4.313
 Goh, T., Ang, B., Xu, X., 2018. Quantifying drivers of co2 emissions from electricity generation – current practices and future extensions. Applied Energy 231, 1191–1204.
 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.174>
 ISO7730, 2023. Moderate thermal environments. determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort.
 Pigliaiule, I., Casaccia, S., Morresi, N., Arnesano, M., Pisello, A. L., Revel, G. M., 2020. Assessing occupants’ personal attributes in relation to human perception of environmental comfort: Measurement procedure and data analysis. Building and Environment 177, 106901.
 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106901>